

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra chemie



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

Problematika kadmia u máku

Bakalářská práce

Eva Humburská

Kvalita potravin a zpracování zemědělských produktů

Ing. Matyáš Orsák, Ph.D.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Problematika kadmia u máku" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21.4. 2023

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu práce panu Ing. Matyáši Orsákovi, Ph.D. za poskytnutí potřebných rad a připomínek na konzultacích, které vedly k sepsání této bakalářské práce.

Problematika kadmia u máku

Souhrn

U potravinářských odrůd máku se dlouhodobě sleduje obsah kadmia v semenech. Kadmium jako karcinogenní prvek představuje riziko pro lidské zdraví, a proto je jeho obsah v možných rizikových potravinách legislativně upraven. V případě makových semen je povoleno množství 0,8 mg Cd/kg.

Kadmium působí negativně na výnos a kvalitu produkce. U máku setého je obsah kadmia v semenech spojen i se zvýšenou produkcí alkaloidních látek, jako obranného mechanismu proti abiotickému stresu. Typické je také narušení živinového systému, kdy může docházet k nedostatku prvků důležitých pro výživu. Obsahy kadmia v rámci rostliny máku jsou nejvyšší v semenech. Reprodukční orgány jiných rostlin obvykle vykazují nejmenší množství kadmia. Mák se označuje za tzv. akumulátorovou rostlinu, jelikož často jeho obsah v semenech převyšuje množství obsažené v půdě a má tendenci k akumulaci prvku i při nízkých koncentracích.

Nejčastěji příjem kadmia rostlinou probíhá na úrovni vztahu půda-rostlina. Často se stává, že vlivem nedostatku vápenatých iontů v půdě, ztrácí kadmium konkurenci při obsazování volných míst v půdním roztoku. Vzhledem k velmi podobným chemickým vlastnostem vápníku a kadmia, kadmium využívá vápenaté kanály k transportu do rostliny skrz kořenový systém a snadno se dále akumuluje. Na základě obecně vysoké mobility následně probíhá transport do nadzemních částí rostliny a kadmium lze zaznamenat ve všech oblastech rostliny.

Nejúčinnějším omezením přístupnosti kadmia rostlině máku se jeví volba vhodného pozemku s odpovídající půdní reakcí a dostatkem základních živin, především vápníku, na který má mák setý zvýšené nároky. Obecně se pro pěstování máku setého doporučují středně-těžké půdy, pH v rozmezí od 6,2 po 6,8 s dostatkem organických látek. V případě potřeby vylepšení hodnoty půdní reakce (pH) se využívá nejčastěji melioračního vápnění.

Pro stanovení obsahu kadmia v rostlině máku se využívá instrumentální metody atomové absorpční spektrometrie, díky které je možné stanovovat i stopová množství požadovaného prvku s dostatečnou přesností.

Klíčová slova: AAS; *Papaver somniferum*; rizika; těžké kovy; toxicita

The Problems of Poppy Containing Cadmium

Summary

For food poppy varieties, the cadmium content of the seeds is monitored for a long time. As a carcinogen, cadmium poses a risk to human health and is therefore regulated by law in potentially hazardous foods. In the case of poppy seeds, cadmium is allowed at 0.8 mg Cd/kg.

Cadmium has a negative effect on yield and the quality of production. In opium poppy, the cadmium content in the seeds is also associated with increased production of alkaloid substances as a defence mechanism against abiotic stress. Typical is also the disruption of the nutrient system, where there may be a deficiency of elements important for nutrition. Cadmium levels within the poppy plant are highest in the seeds. Reproductive organs of other plants usually show the lowest levels of cadmium. Poppy is referred to as an accumulator plant because its content in the seeds often exceeds that in the soil and it tends to accumulate the element even at low concentrations.

Cadmium uptake by the plant is most often at the soil-plant level. Often, due to the lack of calcium ions in the soil, cadmium loses competition for the vacancies in the soil solution. Given the very similar chemical properties of calcium and cadmium, cadmium uses the calcium channels to be transported into the plant through the root system and is easily accumulated. On the basis of the generally high mobility, transport to the above-ground parts of the plant subsequently takes place and cadmium can be detected in all areas of the plant.

The most efficient way to limit the accessibility of cadmium to the poppy plant is to choose a suitable plot with an appropriate soil reaction and sufficient essential nutrients, especially calcium, which poppy plants have high requirements for. In general, medium-heavy soils with a pH between 6.2 and 6.8 and plenty of organic matter are recommended for growing poppies. If the soil reaction value (pH) needs to be improved, ameliorative liming is most often used.

For the determination of the cadmium content in the poppy plant, the instrumental method of atomic absorption spectrometry is used, which makes it possible to determine even trace amounts of the desired element with sufficient precision.

Keywords: AAS; *Papaver somniferum*; risks; heavy metals; toxicity

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Cíl práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Biologická charakteristika	10
3.2	Morfologie rostliny.....	10
3.2.1	Semeno	10
3.2.2	Kořenová soustava.....	10
3.2.3	Listy	10
3.2.4	Lodyha	11
3.2.5	Květ.....	11
3.2.6	Plod	11
3.3	Využití máku	12
3.4	Historie a současnost.....	12
3.4.1	Tradice a pěstování v České republice	12
3.4.2	Pěstování ve světě.....	13
3.5	Základy pěstování máku	14
3.5.1	Legislativa.....	14
3.5.2	Požadavky na prostředí.....	15
3.5.2.1	Oblast pěstování.....	15
3.5.2.2	Půda	15
3.5.2.3	Světlo	15
3.5.2.4	Teplo.....	16
3.5.2.5	Vlaha.....	16
3.5.3	Výživa a hnojení máku	16
3.6	Výskyt a obsah látek v máku	17
3.6.1	Alkaloidy	17
3.6.1.1	Morfín.....	17
3.6.1.2	Kodein	18
3.6.1.3	Thebain	18
3.6.1.4	Papaverin	18
3.6.1.5	Noskapin	18
3.6.2	Nutričně cenné látky	18
3.7	Kadmium	19
3.7.1	Významné zdroje kontaminace kadmíem.....	19
3.7.2	Toxicita pro člověka	20

3.7.3	Výskyt v půdě a v rostlině	20
3.7.4	Možné způsoby sanace půd znečištěných toxickými kovy	21
3.7.4.1	Chemické metody.....	21
3.7.4.2	Fyzikální metody.....	22
3.7.4.3	Biologické metody	22
3.7.5	Fytotoxicita kadmia	22
3.7.5.1	Oxidační stres.....	23
3.7.5.2	Fotosyntéza	23
3.7.5.3	Vodní bilance rostliny	23
3.7.5.4	Esenciální prvky.....	24
3.7.5.5	Thiolové skupiny.....	24
3.7.5.6	Poškození buněčných organel	24
3.7.6	Obranné mechanismy rostliny	24
3.8	Kadmium v máku.....	25
3.8.1	Distribuce kadmia v máku	25
3.8.2	Možnosti eliminace kadmia u máku	26
3.8.3	Vliv genotypu na ukládání kadmia v semeni máku.....	27
3.8.4	Vliv lokality pěstování a hnojení na ukládání kadmia v semeni máku	27
3.8.4.1	Lokalita	27
3.8.4.2	Hnojení.....	29
3.8.5	Vliv kadmia na obsah alkaloidů.....	30
3.9	Atomová absorpční spektrometrie	30
3.9.1	Princip.....	30
3.9.2	Instrumentace.....	31
3.9.3	Analýzy provedené u máku	31
4	Závěr	33
5	Seznam použitých zdrojů	34
5.1	Tištěné monografie.....	34
5.2	Články v periodikách.....	36
5.3	Webové stránky.....	38
6	Seznam použitých tabulek.....	39

1 Úvod

Mák setý (*Papaver somniferum* L.) je pro Českou republiku a řadu okolních států významnou olejinou využívanou v potravinářství. Je součástí mnoha oblíbených receptů a jednoznačně je spjat s tradicemi mnoha zemí, především ve střední a východní Evropě již od nepaměti. Je také cenným zdrojem nutričně prospěšných látek, především nenasycených mastných kyselin a řady makroprvků, jako je vápník nebo draslík. Pro Českou republiku představuje i artikl určený k vývozu. Vzhledem k těmto skutečnostem je u potravinářského máku pečlivě sledována kvalita jeho semen uváděných na trh. O odborné poradenství v souvislosti s produkcí máku, ale i jeho popularizaci se v České republice zasloužil především spolek Český modrý mák se sídlem na České zemědělské univerzitě v Praze.

2 Cíl práce

Cílem práce bylo zhodnotit problematiku výskytu kadmia u máku. Upozornit na rizika plynoucí ze zvýšeného množství tohoto prvku v rostlině a navrhnout řešení, která by přispěla k minimalizaci jeho výskytu jak v půdě, tak v rostlině, jelikož množství kadmia v půdě může poměrně přesně korelovat s koncentrací v rostlině. V rámci bakalářské práce tudíž bylo důležité zhodnotit mechanismy vstupu prvku do rostliny a jeho akumulace v ní. Dalším vytyčeným cílem bylo popsat metody vedoucí k co nejpřesnějšímu stanovení množství prvku v rostlině. Významnou analytickou metodou v případě kadmia je atomová absorpční spektrometrie, jejíž postup a princip byl v práci zhodnocen a popsán.

3 Literární rešerše

3.1 Biologická charakteristika

Rod mák zahrnuje kolem 100 a více popsaných druhů (Vašák et al. 2010). Novák & Skalický (2017) uvádí 110 druhů. Baranyk et al. (2010) tvrdí, že se jedná až o 120 druhů. Druhy se od sebe liší v morfologických, fytochemických a karyologických znacích a na základě těchto rozdílů jsou členěny do odlišných taxonomických kategorií (Baranyk et al. 2010), které se neustále zpřesňují na základě nově získaných informací. Mák setý (*Papaver somniferum* L.) patří do čeledi makovité (*Papaveraceae*), sekce *Papaver*, kam se řadí spolu s mákem štetinkatým (*Papaver setigerum* DC.) (Baranyk et al. 2010; Vašák et al. 2010).

3.2 Morfologie rostliny

3.2.1 Semeno

Semena máku mají ledvinovitý tvar a dosahují délky mezi 1-1,5 mm. Mohou mít řadu barevných odstínů od okrové, hnědé, červené, šedé, fialové, po černou. Nejtypičtější barvou semen je modrá. Barva semen ovlivňuje do značné míry i jejich strukturu. Tmavá semena jsou oproti světlým semenům odolnější a tvrdší, díky tomu nedochází tak snadno k jejich mechanickému poškození během sklizně. Nevýhoda mechanického poškození semen spočívá hlavně ve žluknutí oleje v nich obsaženém a znehodnocení potravinářské produkce. Navíc dojde k poškození chuti semen, kdy místo příjemně sladké chuti maková semena nepříjemně zhořknou. Zárukou typické chuti makových semen jsou především odrůdy tmavě modré barvy, které mají pevněji vyvinuté osemení, dostatečné množství ligninu, vlákniny, a především chuťových látek. Osemení je pětivrstevnaté a tenké, což umožňuje jednoduché zásobování semen vodou, naopak v podmínkách sucha může docházet k příliš rychlému vysychání a znehodnocení produkce (Baranyk et al. 2010; Vašák et al. 2010).

3.2.2 Kořenová soustava

Kořenová soustava se skládá z hlavního dužnatého kořene, který se rozvětňuje do více kořenů postranních. Tudíž pro uspořádání kořenového systému máku setého lze použít termín allorhizie. Kvůli hloubce kořenové soustavy (50-70 cm) může snadno docházet k vyvrácení rostliny (Baranyk et al. 2010; Vašák et al. 2010).

3.2.3 Listy

Listy máku jsou různorodé podle jejich umístění na rostlině. Mohou dorůstat do mnoha tvarů, například vejčitých, polodlouhých, zubovitých nebo celistvých (Baranyk et al. 2010; Vašák et al. 2010; Novák & Skalický 2017). Jejich povrch je pokryt vrstvou vosku, ochraňující rostlinu před hnojivý a herbicidy (Vašák et al. 2010).

3.2.4 Lodyha

Výška lodyhy máku je ovlivněna jednak geneticky, ale také podmínkami oblasti pěstování (Baranyk et al. 2010; Vašák et al. 2010). U českých odrůd máku dosahuje výšky 1-1,8 metru. Snahou je, aby se lodyha příliš nerozvětvovala, což by představovalo obtížnější sklizeň pro pěstitel (Vašák et al. 2010). Vnitřek lodyhy je tvořen houbovitou dřevinou. Větvění lodyhy závisí na odrůdě máku. Může se větvit blízko zemi nebo až ve více než polovině lodyhy. U máku se můžeme často setkat s vrcholičnatým větvením, které vede k přerůstání hlavní lodyhy postranními větvemi (Novák & Nováková 2018).

3.2.5 Květ

Květy máku jsou oboupohlavné, tudíž mají samčí i samičí pohlavní orgány (Novák & Skalický 2017). Jsou tvořeny čtyřmi korunními lístky a dvěma kališními lístky (Vašák et al. 2010). Rostlina máku má tzv. prchavý kalich, to znamená, že během rozkvetu dojde k opadání kališních plátků (Novák & Nováková 2018). Květy mohou být fialové, červené, bílé nebo růžové. Korunní plátky obvykle mají odlišně zbarvenou bázi (Baranyk et al. 2010; Novák & Skalický 2017). Rostlina máku obsahuje vysoké množství tyčinek, tudíž dochází i k rozsáhlé produkci pylu. Tato skutečnost vede k tomu, že přestože mák je samosprašnou rostlinou, je cílovou rostlinou pro opylovače. Je prokázáno, že včely opylující mák se projevují útočným a agresivním chováním (Vašák et al. 2010).

3.2.6 Plod

Plodem máku je makovice neboli tobolka. Podle tobolky se mák dělí na dva druhy, a to mák hled'ák a mák slepák. Mák hled'ák má otvory pod bliznou, kterými mohou propadávat semena ven z tobolky, a proto není příliš žádoucí. Mák slepák má tobolku uzavřenou. Velikost a tvar tobolky mohou být ovlivněny odrůdou, prostředím, ale i agrotechnickými postupy (Baranyk et al. 2010; Vašák et al. 2010). Makovice se napojuje ke stonku prostřednictvím kolénka (Novák & Nováková 2018). Barva tobolky může být zelená nebo hnědofialová díky přítomnosti antokyanů. Vnitřek tobolky se skládá z plodolistů, na kterých dochází k vývoji semen. V tobolce je největší množství mléčnic z celé rostliny. Mléčnice jsou součástí floémové části rostliny a jsou vyplněny latexem, ve kterém se nachází alkaloidy. Přítomnost mléčnic je tak zásadním faktorem pro množství alkaloidů v rostlině (Baranyk et al. 2010). Parametry tobolky jsou nejvíce spojeny s odrůdou máku, která však nemusí být jediným faktorem. Při odchýlení se od agrotechnického postupu může dojít například k protáhnutému tvaru tobolek a jejich menšímu vzrůstu v případě, že rostliny máku rostou v příliš hustém porostu s nedostatečným prostorem okolo sebe (Novák & Nováková 2018).

3.3 Využití máku

Mák se pěstuje především pro účely farmaceutické a potravinářské. Malá část rostlin máku může být využita jako okrasa v zahradách. Ve farmacii se využívá máku, který obsahuje vysoké množství alkaloidů v mléčnicích, díky dobře vyvinutému systému cévních svazků ve floémové části. Alkaloidy se tak z rostliny izolují a následně se používají na výrobu léčiv s tisíci účinky. Tento typ máku se pěstuje především v oblastech se subtropickým klimatem. V České republice a řadě dalších států je produkce máku státem regulovaná a podmínky pěstování jsou ukotveny v legislativě. Najdou se však státy, především v Asii, jako je například Afghánistán, kde je vysoce rozšířená nelegální produkce opiátů (Lohr & Mikšík 2020).

3.4 Historie a současnost

Mák je považován za starou kulturní plodinu. První nálezy makových rostlin pochází již z období neolitu z území dnešního Švýcarska a jihu Francie. Rostlina byla ceněna především kvůli zklidňujícím účinkům, čehož využívala řada starověkých civilizací (Baranyk et al. 2010). Zvěsti o léčivých účincích máku se postupně šířily na území Číny a Indie. Pro Čínu se stala problematika opia zásadním tématem. Po zákazu prodeje tabáku čínským císařem došlo k rozsáhlému dovozu opia z území Indie a navyšoval se počet závislých obyvatel. Snahy Číny omezit dovoz vyústily až v opiové války, které měly za následek zlegalizování užívání opia a jeho značné rozšíření. Přítrž užívání opia na území Číny přišla až s 20. stoletím a momentálně je pěstování máku k farmaceutickým účelům státem regulováno (Vašák et al. 2010). Evropa se poměrně lišila ve využívání máku. Účinků opia začal využívat až lékař Paracelsus v 16. století. Do té doby se mák pěstoval pouze za účelem produkce semen od období středověku (Vašák et al. 2010). Mák setý (*Papaver somniferum* L.) podrobně popsal a latinsky pojmenoval v roce 1753 botanik Carl Linné (Lohr & Mikšík 2020).

V současné době se mák využívá hlavně k potravinářským a farmaceutickým účelům. Pro potravinářský mák jsou nejtypičtější modrosemenné odrůdy. Můžeme se setkat i s produkcí máku bělosemenného, která je typická pro oblast Turecka. V případě modrosemenného máku lze zaručit nejlepší možné kvalitativní vlastnosti suroviny. Tradice v konzumaci máku setého je především v zemích střední a východní Evropy. U máku technického, používaného k výrobě léků se využívá odrůd, které obsahují vysoké množství alkaloidů, vhodných pro extrakci a následnou výrobu léčiv, a jsou tudíž nevhodné ke konzumaci. U rodu Mák (*Papaver*) bylo dohromady popsáno okolo 140 druhů alkaloidů, jako je morfin, kodein, thebain, oripavin a další (Lohr & Mikšík 2020).

3.4.1 Tradice a pěstování v České republice

Pěstování máku na území České republiky sahá až do daleké historie. Již v 6. století se stal nedílnou součástí kultury Slovanů (Lohr & Mikšík 2020). Pěstování jako okrasné plodiny je typické pro období středověku (Vašák et al. 2010). O plodině existuje řada lidových písní, stala se součástí názvů vesnic a její motivy jsou promítnuty do lidových krojů a výšivek (Lohr & Mikšík 2020).

Mák v České republice se hojně využívá v pekařství a cukrářství. Je součástí náplní závinů, buchet a používá se jako posyp na pečivo. Díky nasládlé chuti jeho semen je vhodný do většiny sladkých pokrmů. O jeho oblíbenosti svědčí fakt, že Česká republika se pyšní jeho nejvyšší spotřebou na osobu za rok, která činí okolo 400 gramů. Jeho pěstitelské plochy dosahují úctyhodných průměrných 40 hektarů na jednoho pěstitele. Mák se pěstuje na většině území České republiky s výjimkou horských oblastí a oblastí s extrémním suchem. Největší plochy máku jsou na území Středočeského kraje (Lohr & Mikšík 2020).

Potravinářská produkce máku setého v České republice představuje významný vývozní artikl. Až 85 % české produkce je vyváženo do zahraničí. Pravidelný vývoz probíhá zhruba do 30-35 zemí světa. Největšími odběrateli jsou především sousední státy, jako Slovensko, Polsko, Rakousko a Německo. Významná část produkce putuje i do Indie (Lohr & Mikšík 2020).

K propagaci českého máku přispělo zásadně získání Chráněného zeměpisného označení, které se uděluje v rámci Evropské unie a představuje známku kvality. Jedná se o spojení komodity s určitým územím, kde může probíhat produkce, zpracování nebo příprava (Vokřál 2022).

Získání České cechovní normy zaručuje, že Český modrý mák splňuje požadavky kvality, které jsou v ní zaneseny a brání trh a zároveň spotřebitele před nekvalitní a závadnou produkcí. Spotřebitel tak může upřednostnit ověřenou produkci, před dovozem ze zahraničí, který často nesplňuje odpovídající kvalitativní ukazatele (Vokřál 2022).

V roce 2001 byl založen spolek Český modrý mák (c) Český modrý mák 2022). Spolek sídlí na půdě České zemědělské univerzity v Praze. Mezi jeho členy patří celá řada odborníků, kteří společně aktivně spolupracují. Jeho činnost je rozsáhlá od propagace máku jako tradiční české potraviny, přes ochranu spotřebitele, po poskytování poradenství v pěstitelské oblasti. Činností spolku bylo dosaženo zisku chráněného zeměpisného označení (a) Český modrý mák 2022) a české cechovní normy (b) Český modrý mák 2022). Díky těmto chráněným označením stoupl zájem v zahraničí a mohla být navýšena cena pro vývoz (Vokřál 2022). Každým rokem pořádá odborné semináře, na kterých se diskutují nejnovější trendy a problémy v pěstování (c) Český modrý mák 2022).

3.4.2 Pěstování ve světě

Až 60 % světové produkce máku se využívá pro potravinářské účely. Konzumace máku setého je typická především pro národy střední a východní Evropy (Česká republika, Polsko, Rakousko, Německo, Slovensko atp.). Některé státy dokonce považují konzumaci máku za nelegální. Technický mák se nejvíce pěstuje v Austrálii, Španělsku, Velké Británii, Francii a Číně (Lohr & Mikšík 2020).

Zásadní rozdíl mezi mákem pěstovaným pro produkci semen a pro technické účely spočívá v množství alkaloidů v latexu. Zatímco olejnatá semena určená pro potravinářství obsahují minimum alkaloidů, nebo dokonce žádné množství, technické druhy máku to mají opačně. Na základě těchto skutečností řada států přistoupila k legislativním opatřením

a kontrolám pěstitelů a dovozců státními orgány. Přesto se však v řadě států lze setkat s nelegální produkcí vedoucí k výrobě drog (Baranyk et al. 2010).

Produkce máku za účelem výroby drog se uskutečňuje v řadě asijských zemí se subtropickým klimatem, které je ideální pro produkci vhodných odrůd. S rozsáhlou produkcí opia a heroinu se potýká Afghánistán, Pákistán, Myanmar, Thajsko nebo Laos (Baranyk et al. 2010).

Afghánistán je největším pěstitelem a vývozcem drog na světě. Téměř veškeré zásoby opia, potažmo heroinu v Evropě a Kanadě pochází právě z afghánských provincií. Pěstování máku setého se za přispění moderních technologií rozšířilo i do oblastí pouští, kde byly vytvořeny ideální podmínky pro pěstování. Produkce drog tvoří významnou část hrubého domácího produktu země a neustále narůstá. I přes pobyt spojeneckých vojsk v zemi během let 2001-2021 a jejich snahu o potírání obchodu s drogami nedošlo k poklesu produkce, a naopak se předpokládá neustálá rostoucí produkce, ať už v souvislosti s mocí hnutí Talibán, nebo s ekonomickou situací v zemi (Kratina & Tošnarová 2022).

3.5 Základy pěstování máku

Pěstování máku setého sebou nese řadu specifických opatření. Jedním z nich je celá řada legislativních požadavků, které mají zabránit jeho možnému zneužití v nelegální produkci sloužící k výrobě drog. Další významnou část těchto opatření má za cíl ochranu spotřebitele před konzumací nekvalitní produkce, která by mohla obsahovat větší množství opiových alkaloidů, než je určený limit pro mák nebo zvýšená množství kadmia v semeni. V rámci EU existují poměrně účinné kontroly kvality a bezpečnosti makových semen. Většina produkce tak odpovídá požadované kvalitě.

3.5.1 Legislativa

Při pěstování máku na ploše větší než 100 m² vzniká pěstitelům ohlašovací povinnost celnímu úřadu dle § 29 Zákona č.167/1998 Sb., O návykových látkách a o změně některých dalších zákonů s účinností od 1. ledna 1999 (d) Český modrý mák 2022).

Pro příjemce potravin vzniká povinnost dle Vyhlášky č. 172/2015 Sb. informovat státní dozorové orgány o příjmu suroviny z jiných členských států Evropské unie nebo ze třetích zemí. V případě máku by oznámení mělo být učiněno nejdéle do 48 hodin před samotným dovozem (d) Český modrý mák 2022).

Vyhláška č. 399/2013 Sb. říká, že pro potravinářství lze použít pouze semena z máku setého s obsahem do 0,8 % morfinových alkaloidů v makovici a pro povrch makového semene je akceptovatelná hodnota obsahu alkaloidů maximálně do 25 mg/kg. Vyhláška také určuje chemické a fyzikální parametry jakosti olejnatých semen (d) Český modrý mák 2022). Na základě Nařízení Komise 2021/2142 bylo stanoveno přípustné množství opiových alkaloidů v máku, které by nemělo přesáhnout 20 mg/kg (a) EUR-Lex 2021).

Při vyhledávání legislativních požadavků na povolené množství opiových alkaloidů jsem narazila na nesrovnalosti mezi limity v České republice a evropskou legislativou, která by

měla být nadřazená legislativě jednotlivých členských států EU. Rozpor byl nejspíše zapříčiněn pomalejším schvalováním nařízení od EU a jeho zařazení do praxe.

Roku 2021 došlo k vydání nových nařízení v rámci Evropské komise, vztahujících se na všechny členské státy Evropské unie. Nařízení Komise EU 2021/1323 pro stanovení maximálních limitů kadmia v makovém semeni určilo přijatelnou hodnotu kadmia v semenech máku na 1,2 mg/kg (b) EUR-Lex 2021). Česká vyhláška č. 399/2013 Sb., je však přísnější, jelikož je v ní stanovené přípustné množství kadmia na 0,8 mg/kg (Zákony pro lidi 2013).

3.5.2 Požadavky na prostředí

3.5.2.1 Oblast pěstování

Pro pěstování máku je vhodná většina území v České republice. Mák nepotřebuje speciální podmínky oproti jiným plodinám, ale přesto je poměrně náročný na pěstování (Bechyně 1993; Vašák et al. 2010). Zásadní při výběru oblasti je zaměřit se na plochy, které jsou minimálně návětrné z důvodu snadného poléhání rostliny vzhledem k jejímu mělkému zakořenění. Dalším podstatným faktorem je nadměrná vlhkost, která je vysoce nevhodná (Vašák et al. 2010). Bechyně (1993) uvádí, že nejvhodnějšími oblastmi pro pěstování máku setého se jeví v bramborářských a řepářských výrobních typech.

3.5.2.2 Půda

Půda představuje zásadní faktor při výběru vhodného pozemku k pěstování máku setého (Vašák et al. 2010) Důležité je sledovat pH půdní reakce, která by se mělo pohybovat v rozmezí 6,2-6,8 (Malý & Kapletová 2018). Jako ideální se jeví půdy hlinité až jílovitohlinité. Kyselé půdy jsou při pěstování máku naprosto nevhodné, vzhledem k nebezpečí expozice rostliny těžkým kovům, především kadmia, obtížnějšímu příjmu esenciálních prvků a narušenému vodnímu režimu (Černý 2019). Navíc vychýlení se od hodnot, ať při vyšším či nižším pH, má za následek omezení přístupnosti některých živin rostlině (Černý et al. 2020). Mák také potřebuje ke svému růstu dostatečně prokypřenou půdu s dostatkem živin a humusu (Vašák et al. 2010).

3.5.2.3 Světlo

Sluneční záření přispívá k růstu a vývoji rostliny. Především pro dozrávání semen v tobolkách a období rychlého růstu rostliny je klíčové (Bechyně 1993). Naopak jeho nedostatek se projevuje na celé rostlině, konkrétními příklady mohou být produkce semen, výška rostliny nebo nízký obsah alkaloidů (Vašák et al. 2010).

3.5.2.4 Teplo

Požadavky na teplo se mění vzhledem k obdobím vegetace. Lze jej vysévat v jarních i podzimních měsících vzhledem k tomu, že v době vcházení hyne až při teplotách -8 až -6 °C (Bechyně 1993; Vašák et al. 2010).

S postupným vývojem rostliny, včetně jejích generativních orgánů, klesá její odolnost vůči nízkým teplotám (Vašák et al. 2010). Teplota má významný vliv na klíčení semen. Bechyně (1993) udává, že při teplotě 18-20 °C dojde ke klíčení již do 3-4 dnů (Bechyně 1993). Mák lze jednoznačně zařadit mezi plodiny teplomilné, jelikož příliš vlhka může zapříčinit jeho vyšší náchylnost k černím a k oxidaci oleje v semenech (Vašák et al. 2010).

3.5.2.5 Vlaha

Od vzejití po rozkvet mák vyžaduje dostatek vláhy (Bechyně 1993; Vašák et al. 2010). V některých zemích, jako Tasmánie přistoupili k jeho zavlažování, jelikož období sucha značně snižují výnosy. Řešením problému by mohlo být zkvalitnění používaného osiva nebo brzké setí, které by využilo vláhy ze zimních měsíců (Vašák et al. 2010).

3.5.3 Výživa a hnojení máku

Při výživě máku je nutno hodnotit řadu faktorů. V případě hnojení dusíkem je potřeba zvážit zvolenou předplodinu v osevním postupu, prostředí, půdní druh nebo množství vody v půdě. Obvykle se hnojení dusíkem dává na 2 fáze. Nejprve se použije před osetím dané plochy, poté až při háčkování poupat. Pro zvolení adekvátního množství dusíku je proveden odběr půdy v orniční vrstvě do hloubky 0-30 cm. Nedostatek dusíku způsobuje v rostlině máku změny barvy porostu a tvaru i růstu listů. Naopak při nadbytku prvku dochází k přílišnému poléhání, nesprávnému dozrávání a zpomalení kvetení (Linková & Malý 2017). Dohromady by měla dávka dusíkatých hnojiv představovat okolo 60 až 80 % potřeby na celkový výnos. Pro dosažení odpovídajících účinků hnojiva je vhodné zvolit na počátku růstu nitratové formy hnojiv, jako je například ledek amonný. Naopak za nevhodné jsou považovány amonné formy, které nepodporují dostatečně prodlužování kořenů (Černý 2019).

Vápník je stěžejním prvkem ve výživě máku. Při nízkých hodnotách pH se jeho dostupnost pro rostlinu snižuje (Musil 2017). S přidavkem vápníku do půdy může docházet ke zhoršení dostupnosti mikroprvků, jako je bor a zinek, rostlině (Malý & Kapletová 2018). Aby se zabránilo nedostatku mikroprvků způsobeného nadměrným vápněním, využívá se hnojení částí vápníku již k předplodině, tzv. melioračního vápnění. K předplodině se přidá vyšší dávka vápníku a nižší dávka se aplikuje v podzimních měsících. Nasycení vápníkem je vhodné alespoň do 70 % kationtové výměnné kapacity (Černý 2019).

Fosfor a draslík jsou zásadními prvky pro tvorbu semen a období květu (Malý & Kapletová 2018). Dostatek fosforu koreluje s příznivými obsahy dusíku, vápníku nebo hořčiku (Černý 2019).

Obsah síry úzce souvisí s kvalitou makoviny a výnosem semen. Jeho nedostatek může omezovat využití dusíku rostlinou. Je vhodné hnojit sírou po celou dobu vegetace i s ohledem na její účast při tvorbě produktů fotosyntetické aktivity. Mezi další významný prvek patří

hořčík, který stejně jako síra, má vliv na proces fotosyntézy tak, že působí na tvorbu chlorofylu. Ovlivňuje enzymatické systémy, pomáhá při fixaci oxidu uhličitého do organických sloučenin. Zároveň je důležitý pro metabolismus dusíku a příjem fosforu (Malý & Kapletová 2018).

Mezi stopové prvky klíčové ve výživě máku patří bor, molybden a zinek. Borem se hnojí v několika opakováních s ohledem na jeho střední mobilitu. Jeho nedostatek způsobuje zasychání vzrostného vrcholu, hnědnutí nejmladších částí rostlin a opožděný vývoj. Nedostatek molybdenu obvykle způsobuje nekrózy listů a jejich žlutavé zabarvení. Deficience zinku se projevuje napadením mladých částí rostlin (Linková & Malý 2017).

3.6 Výskyt a obsah látek v máku

Následující kapitola je věnována ve stručnosti látkám, které jsou obsaženy v makovém semeni. Makové semeno je ceněno pro obsah řady prospěšných látek v lidské výživě. V souvislosti s ním se mluví především o vysokém obsahu nenasycených mastných kyselin a vápníku. V případě máku určeného k farmaceutickým účelům jsou žádoucí alkaloidy, naopak v potravinářském máku se jejich množství přísně sleduje a je nežádoucí.

3.6.1 Alkaloidy

Alkaloidy patří mezi sekundární metabolity rostlin. Jedná se o látky dusíkaté povahy. Předpokládá se, že jejich funkce pro rostlinu spočívá v její ochraně před škůdci (Vašák et al. 2010). Alkaloidy jsou součástí opia, kde jsou zastoupeny z 10 až 20 % (Muhammad et al. 2021). Muhammad et al. (2021) uvádí, že z máku setého bylo izolováno na 40 různých alkaloidů. Díky svým tlumícím účinkům představují důležitou součást farmaceutického průmyslu, a proto se izolují z makoviny (Novák & Nováková 2018). K produkci alkaloidů slouží speciálně vyšlechtěné odrůdy máku pro průmyslové využití, které mají dostatečně vyvinuté mléčnice a početné množství vodivých pletiv (Vašák et al. 2010). Muhammad et al. (2021) tvrdí, že obsah alkaloidů v máku může ovlivňovat mimo jiné i množství kadmia v máku. Nadměrné množství kadmia v rostlině vyvolá abiotický stres, na který rostlina reaguje zvýšenou produkcí alkaloidů v semeni (Muhammad et al. 2021). Mezi další faktory mající vliv na obsah alkaloidů patří odrůda, pěstební technologie nebo rok pěstování (Vašák et al. 2010).

3.6.1.1 Morfin

Morfin je jedním ze základních alkaloidů v máku. Pro jeho tišící účinky je využíván k tlumení silných bolestí u pacientů s vážnými zdravotními problémy a může být využíván k anestezii (Demirkapu & Yananli 2020). Morfinu patří prvenství jeho objevení, jako prvního alkaloidu. Jeho pojmenování je odvozeno od jména řeckého boha snů Morfea (Novák & Nováková 2018). Při nesprávném dávkování může vyvolat morfin toxicitu a vést až ke smrti člověka. Zvláště citlivé na množství morfinu jsou kojenci a malé děti (Demirkapu & Yananli 2020).

3.6.1.2 Kodein

Kodein bývá obvykle součástí celé řady léku proti kašli nebo neustávajících průjmů. Byly pozorovány případy, kdy došlo k zvýšené citlivosti na kodein u dětí. Vzhledem k tomu, že je schopen procházet placentou a způsobit poškození plodu, nepoužívá se pro léčbu těhotných žen. Není vhodný ani pro kojící ženy, jelikož je detekovatelný v mateřském mléce (Demirkapu & Yananli 2020).

3.6.1.3 Thebain

Jelikož se thebain nedá využít k léčebným účelům, jeho význam pro člověka spočívá v tom, že je prekurzorem látek, které jsou součástí léčiv a používá se tak k jejich výrobě. Jeho zastoupení v opiu je spíše minoritní, okolo 0,1-2,5 % (Kaboudin & Sohrabi 2021).

3.6.1.4 Papaverin

Papaverin má široké využití při léčbě nemocí jako je plicní embolie, infarkt myokardu nebo anginy pectoris. Díky svým antivirovým účinkům se používá při léčbě viru HIV (Demirkapu & Yananli 2020). Má schopnost zvyšovat účinek méně silných léků, například aspirinu (Kaboudin & Sohrabi 2021).

3.6.1.5 Noskapin

Noskapin, neboli narkotin se využívá při léčbě astmatu, protože dokáže ulevit od kašle. Na rozdíl od morfinu, u noskapinu nehrozí vznik závislosti ani riziko vytvoření tolerance k jeho účinkům (Demirkapu & Yananli 2020).

3.6.2 Nutričně cenné látky

Semena máku setého jsou vysoce ceněna pro obsah oleje a příslušných mastných kyselin. Olej jako součást makových semen představuje zhruba 45-54 % jejich hmotnosti. V makovém oleji převažuje množství nenasycených mastných kyselin, které tvoří okolo 89 %, dalších 11 % připadá na nasycené mastné kyseliny (Muhammad et al. 2021). Dominující mastnou kyselinou makového oleje je linolová kyselina. Mezi další významně zastoupené mastné kyseliny patří z nenasycených: palmitoolejová, olejová a linolenová kyselina. Nasycené mastné kyseliny jsou zastoupeny kyselinami: arachidonovou, stearovou, palmitovou (Baranyk et al. 2010; Muhammad et al. 2021). V souvislosti s příjmem vápníku jsou zmiňovány především živočišné potraviny, ale mák, jako zástupce rostlinných komodit, patří mezi významný zdroj tohoto prvku. Faktem ale zůstává, že využitelnost živočišných zdrojů je mnohem vyšší. Hojně zastoupen je i draslík, hořčík nebo fosfor. V máku najdeme i vitaminy, především tokoferoly a minoritně je zastoupen i vitamin C a vitaminy skupiny B (Sabolová 2020).

3.7 Kadmium

Toxické látky představují jednoznačně velkou zátěž pro životní prostředí a současně i pro lidskou populaci, jelikož se jimi mohou snadno kontaminovat rostlinné produkty určené ke konzumaci a působit závažné otravy či onemocnění (Velíšek 1999).

Řada prvků vykazujících toxické účinky, včetně kadmia se zároveň může řadit mezi těžké kovy, které jsou definovány jako látky, jejichž specifická hmotnost je vyšší než 5 g/cm^3 . Těžké kovy se v prostředí vyskytují jednak přirozeně, ale především kvůli antropogenní činnosti v podobě průmyslové výroby. Se zvýšenou industrializací během 20. století došlo k výraznému nárůstu jejich koncentrací v životním prostředí, což představuje výraznou ekologickou zátěž pro celý ekosystém. Ve vysokých koncentracích mohou být toxické pro rostliny i živočichy, včetně člověka (Jaishankar et al. 2014). Jejich nebezpečnost spočívá především ve špatné odbouratelnosti, dlouhé reziduální době a persistenci v životním prostředí (Pan et al. 2018).

V periodické soustavě prvků je kadmium řazeno do skupiny přechodných kovů. V přírodě má 8 stabilních izotopů. Jeho atomová hmotnost je 112,4. Jedná se o těžký kov, pro který je typická bílo stříbrná barva (Amari et al. 2017).

Kadmium bylo objeveno v roce 1817, kdy jej oddělil Friedrich Stromeyer od roztoku zinkové rudy. Poprvé se využilo jako nátěrový pigment žluté barvy, spolu se sulfidem. V dnešní době se nejčastěji využívá jako součást nikl-kadmiových dobíjecích baterií (Wang et al. 2023).

3.7.1 Významné zdroje kontaminace kadmiiem

Mezi významné zdroje kontaminace kadmiiem patří jak přírodní, tak antropogenní zdroje. Antropogenní zdroje představují větší riziko pro životní prostředí, protože kvůli povrchovým vstupům do půdního prostředí zpřístupňují kadmium rostlinám i živočichům a negativně ovlivňují biologicky neaktivnější část půdy (Loganathan et al. 2012). Kadmium má široké uplatnění především v průmyslu (Zulfigar et al. 2022). Hojně se využívá jako přísada nátěrových pigmentů (Jaishankar et al. 2014), při pokovování neboli galvanizaci (Wang et al. 2023) nebo jako stabilizátor plastů (Jaishankar et al. 2014). Typickým příkladem plastu, který využívá kadmia jako stabilizátoru je polyvinylchlorid. Mezi další významné zdroje patří sklářský průmysl, který přispívá k šíření kadmia emisemi do ovzduší a spolu se spalováním fosilních paliv vede ke znečištění atmosféry. Kadmium se také běžně vyskytuje v cigaretovém kouři (Černý et al. 2020). Wang et al. (2023) uvádí, že pro nekuřáky je nejčastějším zdrojem kontaminace kadmiiem potravinový řetězec. V zemědělství může vést ke znehodnocení půdy kadmiiem především nadužívání hnojiv a pesticidů (Zulfigar et al. 2022). Problém představují především fosfátová hnojiva a statkový hnůj (Loganathan et al. 2012). Z přírodních zdrojů nejvíce ovlivňuje množství kadmia v prostředí zvětrávání hornin obsahujících kadmium, sopečné erupce, požáry lesů a odpadní vody (Zulfigar et al. 2022).

3.7.2 Toxicita pro člověka

Kadmium, jako neesenciální těžký kov, představuje závažnou zátěž pro lidský organismus. Patří mezi karcinogenní látky. Může způsobovat jak chronické, tak akutní otravy. Chronická otrava nastává v situaci, kdy je člověk dlouhodobě vystaven účinkům kadmia. Akutní otrava znamená, že lidský organismus byl najednou vystaven dávce daného prvku. Typickým projevem akutních otrav jsou střevní a žaludeční obtíže. Dlouhodobá expozice kadmiu může vést k onemocnění ledvin, jater a osteoporóze, což bylo prokázáno díky studiím prováděným na zvířatech (Jaishankar et al. 2014). S osteoporózou se můžeme setkat u lidí vystavených účinkům kadmia především z důvodu narušení metabolických procesů vitamínu D v ledvinách. Kadmium může také vyvolat hypertenzi a zvyšovat riziko vzniku diabetu (Moghaddam et al. 2020). Nijak výjimečně není ani poškození plic (Wang et al. 2023). Vystavení se vysokému množství kadmia během těhotenství může vést k narození nedonošeného dítěte a k jeho nízké porodní hmotnosti. Člověk kadmium může nejčastěji vdechovat nebo konzumovat spolu s rostlinnými nebo živočišnými produkty (Jaishankar et al. 2014). Především zelenina je náchylná ke kontaminaci těžkými kovy (Pan et al. 2018).

3.7.3 Výskyt v půdě a v rostlině

Aby mohl být jakýkoli prvek přijat rostlinou z půdy, musí být rozpuštěn v půdním roztoku. Kadmium se v půdním roztoku vyskytuje nejčastěji ve své kationtové formě Cd^{2+} . To působí značné problémy, jelikož kadmium má obdobné chemické vlastnosti jako vápník a zinek. Následkem toho pak dochází k tomu, že kadmium se může nahromadit v tkáních a prochází snadno biologickými bariérami (Amari et al. 2017). Zvláště u máku, který má vysoké nároky na obsah jak zinku, tak i vápníku (Linková & Malý 2017) může v případě nedostatku těchto esenciálních prvků v půdě docházet k příjmu kademnatých iontů rostlinou (Mikšik 2020). V případě náhrady zinku kadmiem dochází ke změně struktury bílkovin důležitých pro život (Škarpa & Richter 2017). Na druhou stranu, suplementace půd zinkem se ukázala jako výhodná strategie při omezování příjmu kadmia rostlinou (Mondal et al. 2019).

Kadmium je extrémně mobilní v půdě a poměrně snadno je přijímáno rostlinou z půdního roztoku (Ackova et al. 2018). Rostlina přijímá většinu kadmia prostřednictvím kořenů procesem pasivní difuze nebo aktivním transportem. Příjem těžkých kovů, včetně kadmia, je ovlivněn řadou faktorů, především fyzikálně-chemickými vlastnostmi jak půdy, tak prvku. Mezi konkrétní faktory patří například pH, složení organické hmoty nebo chemická forma kovu. Na absorpci kadmia do rostliny se mohou podílet i listy, které přijímají prvek z atmosférických spadů (Amari et al. 2017).

Bylo zjištěno, že jedním z podstatných faktorů ovlivňujícím biologickou dostupnost kadmia je hodnota pH. Při jeho nízkých hodnotách (kyselé pH), dochází k zvýšení jeho biologické dostupnosti a je také větší šance, že se kadmium přemění z nepohyblivé (imobilní) fáze na pohyblivou (mobilní) fázi, která bude biologicky dostupnější rostlině z půdy (Shaari et al. 2021). Spolu s kyselým půdním prostředím působí negativně i vyšší hodnota kationtové výměnné kapacity (Mondal et al. 2019). Nejčastější forma, se kterou kadmium konkuruje o vazebná místa dalším prvkům v půdním roztoku je Cd^{2+} . Naopak vyšší pH může způsobovat, že se Cd^{2+} bude přeměňovat na imobilní formu (Shaari et al. 2021). Richter & Škarpa (2017)

uvádí, že pouhým zvýšením pH o jednotku došlo k trojnásobně zvýšené půdní sorpci, a naopak zvýšením hodnoty pH z 5,7 na 7,3 poklesla mobilita kadmia na polovinu původní hodnoty (Richter & Škarpa 2017). Po dosažení hodnoty pH 6 by měla být zastavena rozpustnost kadmia do půdního roztoku, jelikož dojde k vytvoření komplexu s organickou hmotou (Zulfigar et al. 2022).

Díky zvýšenému množství organických látek v půdě, především huminových kyselin (Richter & Škarpa 2017), dochází ke tvorbě organokovových komplexů, které zajišťují omezenou rozpustnost kadmia a blokují tak jeho příjem rostlinou (Shaari et al. 2021).

Redoxní potenciál je jedním ze základních faktorů ovlivňujících biologickou dostupnost kadmia. Za aerobních podmínek u oxidace se kadmium vyskytuje ve formě Cd^{2+} , oproti tomu za anaerobních podmínek při redukci vytváří nerozpustné komplexy (Shaari et al. 2021).

Kadmium se do buněk kořenů může transportovat pomocí kationtových kanálů, obvykle vápníkových, které jsou aktivovány depolarizací nebo hyperpolarizací. Kvůli vysoké mobilitě, pomocí transpiračního proudu dochází k transportu prvku z kořene do nadzemních částí rostliny (Amari et al. 2017). Trakal et al. (2009) uvádí, že kadmium patří mezi prvky jednoduše pohyblivé, což vede k tomu, že se běžně nachází i v nadzemních částech rostlin. To potvrzuje i Zulfigar et al. (2022), který píše, že kadmium je pohyblivé díky floému rostliny a může být lokalizováno v jakékoli části rostliny (Zulfigar et al. 2022). K transportu z kořenů do nadzemních částí rostliny napomáhají fytochelatiny. Jedná se o polypeptidy s nízkou molekulovou hmotností. Další možností je využití transportních proteinů (Amari et al. 2017).

3.7.4 Možné způsoby sanace půd znečištěných toxickými kovy

Při nadměrném znečištění půd kadmiiem se využívá chemických, fyzikálních nebo biologických metod k provedení sanace (Pan et al. 2018). Metody se v základu dají rozdělit na in-situ a ex-situ. In-situ metody se aplikují přímo v místě kontaminace, kdežto ex-situ metody využívají možnosti půdu vytěžit a upravit vyčištěním na dálku (Priya et al. 2022).

3.7.4.1 Chemické metody

Princip použití chemických metod spočívá v aplikaci činidel, která změní formu kontaminujícího prvku tak, že znemožní rostlině jeho příjem z půdy v důsledku snížení biologické dostupnosti. V případě kontaminace kadmiiem se využívá především zinku, kvůli jeho podobným chemickým i fyzikálním vlastnostem (Mondal et al. 2019).

Metoda vyluhování je založena na přidání rozpouštědel, jako jsou organické kyseliny nebo povrchově aktivní látky, do půdy a získání výluhu. Její nebezpečnost spočívá v možné sekundární kontaminaci půdy, která způsobí poškození půdní struktury, znečištění spodních vod a následkem toho dojde ke ztrátě významných živin (Pan et al. 2018).

Metoda chemických modifikátorů používá například fosfáty, vápenec, železo nebo další organické látky. Jejím cílem je dosáhnout srážení, adsorpce, oxidace a následně redukce kontaminujících prvků v půdě (Pan et al. 2018).

Dalším řešením by mohlo být nahrazení kontaminované půdy půdou s kvalitními parametry bez znečišťujících prvků. To lze, ale uplatnit pouze na malé ploše vzhledem k náročnosti pracovních úkonů s tím spojených (Pan et al. 2018).

Shrnutím lze konstatovat, že chemické metody jsou použitelné v mnoha případech, ale jejich účinnost je odvislá od řady faktorů, jako je výběr vhodných činidel pro konkrétní půdu, zohlednění rizika možné sekundární kontaminace plynoucí z chemického ošetření půdy nebo počáteční koncentrace kontaminujících prvků v půdě (Pan et al. 2018).

3.7.4.2 Fyzikální metody

Isolační metoda představuje možnost oddělit kontaminovanou půdu od zbytku půdního prostředí. Metoda je opět vhodná pouze pro menší půdní plochy (Pan et al. 2018).

Poměrně vhodnou metodou se zdá být metoda fytoremediace, která spočívá ve vysazení rostlinných hyperakumulátorů, které jsou schopné absorbovat vysoká množství znečišťujícího prvku. Náklady na provedení jsou poměrně nízké a zároveň provedení snadné. Jako jasná nevýhoda se jeví doba očekávaného působení a také selektivní absorpce (Pan et al. 2018).

Jednu z metod fytoremediace, představuje fytoextrakce. Trakal et al. (2009) odebral půdní vzorky z Příbrami za účelem zhodnocení účinnosti metody fytoextrakce (u vrby) těžkých kovů z půdy. Z porovnání kadmia a olova jasně vyplynulo, že kadmium je mnohem lépe přijímáno rostlinou oproti olovu vzhledem ke své mobilitě. Metodou fytoextrakce bylo odstraněno až kolem 3 % kadmia. Dalším významným zjištěním bylo, že při odstranění mikroorganismů a vytvoření vzorku sterilní půdy, došlo ke snížení přístupnosti kadmia rostlině (Trakal et al. 2009).

3.7.4.3 Biologické metody

Princip biologických metod spočívá v použití mikroorganismů nebo živočichů žijících v půdě k absorpci a případně přeměně na jinou formu. Pro znečištěné oblasti se však nedoporučuje, jelikož jejich účinnost je oproti fyzikálním nebo chemickým metodám poměrně nízká (Pan et al. 2018).

3.7.5 Fytotoxicita kadmia

Obecně lze říci, že fytotoxicita kadmia má negativní vliv na výnos a kvalitu rostlinné produkce. Ackova et al. (2018) uvádí, že přijatelný limit kadmia v rostlině by se měl pohybovat od 0,2 do 0,8 mg/kg a toxická koncentrace se projevuje mezi 5-30 mg/kg.

V závislosti na koncentraci kadmia v rostlině, lze některé rostliny klasifikovat jako akumulátory (Ackova et al. 2018). Mezi akumulátory řadíme rostliny, které jsou do určité míry tolerantní k přítomnosti kadmia a dokáží se účinně bránit pomocí svých mechanismů jeho účinkům i při vyšších koncentracích (Zulfigar et al. 2022).

Kadmium může podmiňovat řadu negativních změn a procesů v rámci rostliny. Jedná se především o fyzikálně-chemické, morfologické a strukturální změny. Rozsah nežádoucích anatomických změn závisí na druhu rostliny, délce expozice, množství příjmu a lokalizaci

(Zulfigar et al. 2022). Vysoká toxicita se u kadmia projevuje chlorózou, hnědnutím kořenů a následnou inhibicí růstu (Ackova et al. 2018).

Fytotoxicitu kadmia v rostlinách lze shrnout pomocí několika význačných mechanismů, jako je podobnost esenciálních prvků s kadmiem, působení kadmia na thiolovou skupinu, nadměrná produkce reaktivních forem kyslíku a dislokace esenciálních kationtů z vazebných míst (Zulfigar et al. 2022).

3.7.5.1 Oxidační stres

Stresem z těžkých kovů, kam patří i kadmium, dochází k inaktivaci nebo denaturaci řady enzymů. Zároveň dochází k podpoře tvorby reaktivních forem kyslíku a vzniku cytotoxických sloučenin, což vede k peroxidaci lipidů a proteolýze. Konkrétně dojde ke zvýšení koncentrace peroxidu vodíku, hydroxylových radikálů, oxidu dusnatého a superoxidových aniontů (Amari et al. 2017). Následuje štěpení řetězců DNA. Tyto zmíněné projevy vedou k oxidačnímu stresu (Ghori et al. 2019). Dochází k poškození řady biomolekul, včetně důležitých proteinů. Zároveň reaktivní formy kyslíku reagují s volnými thiolovými skupinami, nezbytnými pro správnou funkci enzymů, které mimo jiné ovlivňují terciální strukturu proteinů (Amari et al. 2017). Změna koncentrace reaktivních forem kyslíku poškozuje esenciální živiny, buněčné pigmenty, lipidy a nukleové kyseliny (Zulfigar et al. 2022).

Díky molekule oxidu dusnatého dochází k regulaci reaktivních forem kyslíku a zvýšení aktivity enzymů vychytávajících peroxid vodíku, a to snižuje oxidační stres v rostlině. Zároveň je významným antioxidantem, který je za pomoci enzymů schopen detoxikace volných radikálů v buňce (Ghori et al. 2019).

Reaktivní formy kyslíku se v rostlině běžně vytváří a usměrňují procesy jako stárnutí, klíčení nebo uzavírání průduchů (Ghori et al. 2019).

3.7.5.2 Fotosyntéza

Ovlivnění jednoho ze základních procesů rostliny, fotosyntézy, může být způsobeno poškozením struktury chloroplastů, omezením biosyntézy chlorofylu nebo nedokonalým transportem elektronů, inhibicí enzymů v Calvinově cyklu a nedostatečným množstvím oxidu uhličitého následkem uzavření průduchů rostliny. Těžké kovy mají schopnost upravovat složení lipidů v thylakoidních membránách chloroplastu. Také mohou inhibovat klíčové enzymy pro syntézu fotosyntetického barviva – chlorofylu, což může být způsobeno nedostatkem esenciálních prvků, které byly nahrazeny kadmiem, popřípadě jiným těžkým kovem. Inhibice enzymů (například Rubisco) v Calvinově cyklu zapříčiňuje zhoršení temnostní fáze fotosyntézy (Amari et al. 2017). Nadbytek kadmia v rostlině se projevuje také nedostatkem železa, což negativně ovlivňuje průběh fotosyntézy. Dalším faktorem je snížená syntéza chlorofylu a inhibice enzymů podílejících se na fixaci oxidu uhličitého (Ghori et al. 2019).

3.7.5.3 Vodní bilance rostliny

K správnému stavu vodní bilance v rostlině přispívá dostatečná rychlost transpirace a odpovídající množství vody. Vlivem přítomnosti kadmia dochází k poklesu obou zmíněných

kritérií. Následkem je výrazné zmenšení povrchu plochy listů, základního transpiračního orgánu a nastává retardace růstu rostliny (Amari et al. 2017). K nesprávnému fungování vodní bilance v rostlině přispívá i narušené uspořádání plazmatické membrány, způsobené peroxidací lipidů (Ghori et al. 2019).

3.7.5.4 Esenciální prvky

Přítomnost kadmia v rostlině negativně ovlivňuje příjem pro rostlinu esenciálních prvků. Ghori et al. (2019) uvádí, že přítomnost kadmia přímo souvisí s příjmem hořčíku, fosforu, vápníku a draslíku. Kadmium má také schopnost kompetitivně nahradit esenciální prvky, což je spojeno s nesprávnou aktivitou enzymů v buňce. Do značné míry dokáže ovlivnit výživu rostliny a jeho koncentrace v rostlině se může projevit úplným nedostatkem, jak makroprvků, tak mikroprvků (Amari et al. 2017).

3.7.5.5 Thiolové skupiny

Kadmium se dobře dokáže navázat na thiolové skupiny bílkovin, a to vede k jejich špatnému skládání a porušení jejich struktury (Amari et al. 2017; Ghori et al. 2019). Vlivem snahy o zachování normálního redoxního stavu buňky, dochází k produkci obranných bílkovin, což může v konečném důsledku vést k navýšení množství proteinů v buňce (Amari et al. 2017).

3.7.5.6 Poškození buněčných organel

Vlivem nadměrného množství kadmia v rostlině dochází k rozkladu mitochondrií, který znemožňuje rostlině dýchání. Jadérko je poškozeno vlivem aberací a fragmentací chromozomů (Ghori et al. 2019). Při dělení buňky dochází k změnám při M a G2 fázi v mitóze, což se projevuje vznikem abnormálních buněk. V plazmatické membráně je kadmium schopno vyvolat změnu v jejím lipidovém složení, což negativně ovlivňuje její funkci (Amari et al. 2017).

3.7.6 Obranné mechanismy rostliny

Rostliny mají přirozeně řadu mechanismů sloužících jako obrana proti abiotickému stresu, který na ně může působit. Tyto mechanismy by především měly být zodpovědné za udržení homeostatického stavu tak, aby rostlina netrpěla nedostatkem esenciálních živin (Ghori et al. 2019).

Při stresu plynoucího z vystavení rostliny působení těžkých kovů včetně kadmia, se jako první obranný mechanismus jeví kořenové exudáty, které omezují těžké kovy při samotném vstupu do rostliny tím, že změni pH rhizosféry, což vede k vysrážení těžkých kovů (Ghori et al. 2019). Ke změně pH dojde díky vylučování organických kyselin, jako je šťavelová nebo citronová kyselina, a činností mikrobiálních společenstev v rhizosféře (Pan et al. 2018).

Další možností jsou mechanismy vedoucí k detoxikaci, chelataci a sekvestraci těžkých kovů ve vakuole. Proces chelatace je uskutečňován pomocí fytochelatinů a metalothionenů, které jsou schopné vázat těžké kovy. U kadmia se uplatňuje chelatace pomocí fytochelatinů navázáním na thiolovou funkční skupinu. Díky buněčné stěně a jejímu obsahu sloučenin s karboxylovými, thiolovými a hydroxylovými funkčními skupinami dochází k navázání

dvojmocných a trojmocných kationtů (v závislosti na funkční skupině) a následné sekvestraci těžkých kovů. Jednou ze složek buněčné stěny je i pektin, který je v mnoha rostlinách vystavených stresu z těžkých kovů nahromaděn v takovém množství, že je jasně pozorovatelné výrazné zesílení celé buněčné stěny. Díky zesílené buněčné stěně se rostlině skýtá možnost využít buněčnou stěnu k sekvestraci těžkých kovů odstraněných z protoplastu a imobilizovat je. Vybrané druhy rostlin využívají symbiotických vztahů s mykorrhizními houbami, které jsou schopné nahromadit těžké kovy v rhizosféře a brání tak jejich přístupnosti rostlině (Ghori et al. 2019).

Část rostlin se vyznačuje schopností přijímat poměrně vysoká množství těžkých kovů. Jedná se o tzv. hyperakumulátory. Jejich součástí jsou speciální enzymy schopné asimilace na organické sloučeniny nebo změny jejich oxidačního stavu (Ghori et al. 2019). Vysazování hyperakumulátorů se používá při technologii zvané fyto-remediace, jejímž cílem je obnova lokalit vysoce kontaminovaných těžkými kovy pomocí vysazení tolerantních rostlin vybavených mechanismy vedoucími k jejich detoxikaci (Amari et al. 2017). Pan et al. (2018) uvádí, že existuje již 700 druhů hyperakumulátorů až v 50 státech na světě. Pro rostliny tolerantní k výskytu těžkých kovů je typická silná vrstva epidermis, která slouží k vytvoření dostatečných zásob vody. Proti zabránění translokaci těžkých kovů do listů je povrch epidermis pokryt voskovou vrstvou kutikuly (Zulfigar et al. 2022).

3.8 Kadmium v máku

Mák patří mezi rostliny, které snadno přijímají toxické kadmium (Lohr 2022). Nejvyšší obsahy kadmia u máku se vyskytují v semenech (Lohr 2022), což je obecně problémem většiny olejnin (Fejér & Šalamon 2010). Nejvyšší koncentrace kadmia se nachází těsně pod povrchem v rozmezí 0-50 mm, v hlubších vrstvách půdy se snižuje (Fejér & Šalamon 2010).

3.8.1 Distribuce kadmia v máku

Aby se rostlina dala označit jako akumulátor určitého prvku, musí jeho koncentrace v ní převyšovat množství prvku obsažené v půdě. Ve srovnání s jinými plodinami pěstovanými ve stejných podmínkách, mák setý (*Papaver somniferum* L.) obsahuje vysoká množství kadmia (Chizzola 2001).

Zvláště u máku setého je, že největší obsahy kadmia v rámci rostliny jsou v semenech, protože obecně platí, že reprodukční orgány obsahují minimální množství kadmia a nejvyšší obsahy lze naměřit v oblasti kořenového systému. U máku se, ale objevují tendence k translokaci prvku ze stonků do semen v období mezi dvěma sklizněmi, kdy nastává snižování biomasy jak stonků, tak listů. Obvykle se snižováním biomasy dochází současně ke snižování množství kadmia. Mák setý, vzhledem ke vztahu ke kadmiu, bývá často označován za indikátorovou rostlinu. To znamená, že na rozdíl od rostlin, které kadmium mají snahu vyloučit, v rámci máku dochází k translokaci z křovitých kořenů do výhonků a následně dalšímu transportu kadmia v nadzemních částech rostliny, především semen. Vzhledem k obecně snadné mobilitě kadmia se rozvod po rostlině uskutečňuje poměrně snadno (Chizzola 2001).

V rámci nádobových pokusů Chizzola (2001) zaznamenal omezení růstu rostliny již při hodnotě 6 mg Cd/kg v substrátu. Snižovaný výnos nastal už při 4 mg Cd/kg půdy. Dále došlo

ke snížení biomasy stonků a listů, nehledě na odrůdu. Naopak výrazně došlo k nárůstu biomasy semen. Již při hodnotách 1,5 až 2 mg Cd/kg půdy došlo k výraznému nárůstu množství kadmia ve všech částech rostliny. Semena rostlin máku, která utvářela až 12,9 % nadzemní sušiny, obsahovala při konečné sklizni mezi 15 a 42 % celkového množství kadmia, což jasně potvrzuje přednostní ukládání kadmia do makových semen (Chizzola 2001).

3.8.2 Možnosti eliminace kadmia u máku

Množství kadmia v jakékoli rostlině, včetně máku, lze ovlivnit v prvotní fázi především výběrem vhodného pozemku k pěstování (Škarpa & Richter 2017). Naprosto nevhodné jsou silně průmyslové oblasti s vysokými spady toxických prvků do ovzduší a prvky kontaminujícími půdní prostředí (Fejér & Šalamon 2010).

Množství prvku v rostlině úzce souvisí s jeho formou v půdě. V případě lehkých půd s převládající oxidací půda obsahuje větší množství mobilních forem kovů, naopak těžší půdy vlivem zvýšené sorpční kapacity lépe vážou kovy a vytváří, tak s nimi nerozpustné komplexy, tudíž je zásadní sledovat hladiny pH půdy (Škarpa & Richter 2017). K rozdělení půdních druhů se přistupuje na základě obsahu a velikosti jednotlivých částí minerálů v půdě obsažených. U máku se obecně doporučují jako ideální středně těžké půdy, s podílem zrnitosti mezi 25-40 % (Černý et al. 2021).

Tabulka 1 Rozdělení půdních druhů podle podílu zrnitosti frakce, převzato z Černý et al. 2021

Podíl zrnitostní frakce <0,01 mm (%)	Půda - půdní druh	
pod 10	písčitá	lehká
10-20	hlinitopísčitá	
20-30	písčitohlinitá	střední
30-45	hlinitá	
45-60	jílovitohlinitá	těžká
60-75	jílovitá	
nad 75	jíl	

V případě pěstování máku setého je vhodné udržovat hodnotu výměnného pH v rozmezí od 6,2 do 6,8 (Musil 2017; Malý & Kapletová 2018). K určení hodnot pH půdy se běžně využívá roztoků chloridu draselného nebo vápenatého (Černý et al. 2020). Při pěstování máku v podmínkách kyselého pH je rostlina jednak vystavena riziku příjmu nežádoucích prvků, jako je kadmium, a zároveň je negativně ovlivněn systém jejích kořenů, což má za následek problém s výživou rostliny (Černý 2019).

V případě vysetí máku do půdy kontaminované kadmii, lze riziko jeho dostupnosti rostlině snížit vápněním. Vhodnou strategií se jeví vápnění rozložit na více etap, protože při jednorázové dávce vápníku může dojít k omezení přístupnosti mikroprvků. Doporučuje se vápnit již předplodinu vyšším množstvím vápníku a poté hnojit v menších dávkách během podzimu před pěstováním. Tento způsob ošetření půdy se nazývá meliorační vápnění. Pro dosažení očekávaného výsledku se vápník zapracuje mělce do půdy (Černý 2019). Nejčastější formou k hnojení vápníkem jsou uhličitany. Při rozhodování o vhodnosti příslušného hnojiva

je nutné přihlédnout k faktorům, jako je půdní druh a množství přístupného vápníku v půdě (Vašák et al. 2010). Vápník představuje ve výživě máku jeden ze zásadních prvků. Při deficitu vápníku a stejně tak zinku se značně navyšuje riziko jeho nahrazení kademnatým kationtem Cd^{2+} (Mikšík 2020).

Huminové kyseliny, jako součást primární organické hmoty, přispívají k příjmu kadmia díky schopnosti vytvářet s ním nerozpustné komplexy (Škarpa & Richter 2017). Díky sorpci humusu, tvořeného fulvokyselinami, huminy a huminovými kyselinami, dochází k imobilizaci kadmia a dalších těžkých kovů (Černý et al. 2021).

Jednou z dalších možností eliminace nežádoucích prvků v půdě je používání kvalitních forem organických hnojiv, která podporují proces půdní sorpce, který vede k jeho zneprístupnění rostlině (Škarpa & Richter 2017).

3.8.3 Vliv genotypu na ukládání kadmia v semeni máku

Větrovcová et al. (2016) provedla polní pokusy na kolekci 119 vybraných genových zdrojů máku, za účelem zhodnocení, zda by na ukládání kadmia v semeni máku mohl mít vliv genotyp. Pokus byl vyhodnocen za období 3 let. Na základě získaných hodnot byla prokázána korelace mezi obsahem kadmia a genomem. Vyhodnocení proběhlo porovnáním 14 vybraných deskriptorů a jejich průměrných hodnot za 3 sledované roky, které by mohly korelovat s množstvím kadmia v semeni. Po porovnání výsledků s platnou legislativou bylo zjištěno, že žádný z genových zdrojů nepřevyšuje zákonné limity obsahu kadmia. V každém vzorku bylo naměřeno určité množství kadmia v semeni (0,278-0,750 mg/kg) (Větrovcová et al. 2016).

Chizzola (2001) potvrzuje, že obsah kadmia v máku může být do značné míry ovlivněn vybranou odrůdou, avšak pouze v případě pěstování na kontaminované půdě. Ve vhodných půdních podmínkách rozdíly mizí a nejsou patrné (Chizzola 2001).

3.8.4 Vliv lokality pěstování a hnojení na ukládání kadmia v semeni máku

Lokalita pěstování je v řadě publikovaných článků a studií považována za zásadní faktor působící na obsah kadmia v rostlině máku, především vzhledem k půdním podmínkám dané oblasti a vhodné půdní reakci, kterou ovlivňuje řada faktorů, včetně antropogenních (Vaculík & Poslušná 2019).

Vaculík & Poslušná (2019) provedli experimenty na maloparcelních i provozních plochách máku za účelem stanovení obsahu kadmia v semeni s přihlédnutím k lokalitě pěstování a hnojení. Pokusy byly vyhodnocovány dle statistických metod za roky 2015, 2016 a 2017 (Vaculík & Poslušná 2019).

3.8.4.1 Lokalita

Vaculík & Poslušná (2019) v rámci svých experimentů stanovovali obsah kadmia ve vzorcích z pokusů s rostlinami, které byly ošetřeny přípravky používanými proti houbovým chorobám rostlin. V rámci lokalit Šumperk, Opava, Červený Újezd a Lešany lze pozorovat značné rozdíly v průměrných hodnotách obsahu kadmia v rostlině. U žádného ze vzorků nebyla naměřena hodnota překračující 0,8 mg Cd/kg (Vaculík & Poslušná 2019).

Tabulka 2 Obsah kadmia ve vzorcích máku z půdních pokusů s fungicidy, 2016 - 2017, převzato z Vaculík & Poslušná 2019

Průměrný obsah kadmia v máku (mg/kg)				
ročník	Šumperk	Opava	Červený Újezd	Lešany
2016	0,751	0,397	0,401	0,44
2017	0,31	0,641	0,282	0,25

Další z experimentů se zaměřil na vzorky rostlin máku pouze z území Olomouckého a Moravskoslezského kraje. Opět se ve všech vzorcích vyskytovalo určité množství kadmia, ale nedošlo k překročení požadovaných limitů stanovených zákonem (Vaculík & Poslušná 2019).

Tabulka 3 Obsah kadmia ve vzorcích z provozních polí s mákem (mg/kg), 2016-2017, převzato z Vaculík & Poslušná 2019

Lokalita	Cd (mg/kg)	Lokalita	Cd (mg/kg)
Krásné údolí	0,322	Jakartovice Deštné podél cesty	0,658
Kněževes Horesedy	0,433	Komárov	0,227
Mohelnice	0,538	Slavkov u vodojemu	0,309
Šumperk Ceramtec	0,123	Zlatníky na kopci	0,203
Kolšov	0,191	Otice u železárny	0,256
Mohelnice II (směr Loštice)	0,216	Chvalíkovice u rybníka	0,259
Chromeč	0,119	Milostovice alkoholka	0,247
Dolní Studénky	0,242	Chlebičov	0,385
Slavkov směr na Zlatníky	0,623	Tábor	0,28
Milotice nad Opavou	0,411	Dolní Životice západ	0,242
Opava u hranice s Polskem	0,234	Stěbořice u cesty	0,338
Stěbořice směr Nový Dvůr	0,32	Velké Heraltice	0,333
Opava pod sv. Annou	0,256	Vetřkovice	0,386
Hořejší Kunčice	0,371	Jakartovice	0,72
Otice u sopky	0,476	Neplachovice	0,222
Bohdanovice	0,272	Jakartovice Deštné	0,773
Slavkov u vodojemu	0,266	Jaktař u STK	0,206
Dolní Životice	0,549	Rohov	0,258
Vršovice	0,376	Opava za Stříbrným jezerem	0,194
Milostovice západ	0,188	Pusté Jakartice	0,6
Opava u školky	0,238		

3.8.4.2 Hnojení

Z provedených pokusů Vaculíka a Poslušné (2019) v období tří let vyplývá, že na základě průměru naměřených hodnot se méně kadmia vyskytovalo v nehnojené kontrole oproti rostlinám, u kterých byla využita listová aplikace hnojiva. Současně se nepotvrdila hypotéza, že by hnojiva obsahující fosfáty měla vliv na nárůst obsahu kadmia v makovém semeni. U veškerých variant, nehledě na lokalitu nebo použité hnojivo však nedošlo k situaci, kdy by makové semeno neobsahovalo žádné množství kadmia (Vaculík & Poslušná 2019)

Lošák & Varga (2022) aplikovali hnojivo obsahující vápník (Kalcis Mag 5) tvořené směsí uhličitanu hořečnatého a vápenatého do seťové rýhy. Po provedení analytického zhodnocení ošetřených rostlin oproti neošetřené kontrole došlo k závěru, že dodání zmíněného hnojiva již v dávce 100-200 kg/ha rostlině, přispělo k poklesu kadmia až o 21 %, tudíž se hnojení prostředkem Kalcis Mag 5 jeví jako výhodné řešení směřující k eliminaci množství kadmia v rostlinách máku setého (*Papaver somniferum* L.), především pak v jeho semenech využívaných hojně v potravinářské produkci (Lošák & Varga 2022).

Tabulka 4 Analýza rostlin na obsah kadmia (Cd) v semeni, makovicích, stonku, kořenu (mg/kg), převzato z Lošák & Varga 2022

	pH	Ca v půdě (mg/kg)	obsah Cd v rostlině (mg/kg)			
			semeno	makovice	stonek	kořen
Varianty						
kontrola	5,52	1 160	1,06	0,22	0,48	1,21
Kalcis Mag 5 (100 kg/ha)	5,74	1 320	0,9	0,19	0,4	1,07
Kalcis Mag 5 (200 kg/ha)	5,9	1 420	0,84	0,2	0,36	0,87

3.8.5 Vliv kadmia na obsah alkaloidů

Lachman et al. (2006) se zabývali vzájemnými souvislostmi mezi obsahem kadmia v rostlině máku a obsahem alkaloidů. Na základě zjištěných dat bylo prokázáno, že vlivem stresu, jako odpovědi rostliny na přítomnost kadmia, dochází k zvýšené produkci alkaloidů, konkrétně papaverinu, narkotinu a morfinu. Kadmium v rostlině způsobí, že dojde k nástupu a zvýšení biosyntézy narkotinu. Předpokládá se, že produkce alkaloidů je jakýmsi obranným mechanismem rostliny. Zároveň byla nalezena lineární závislost mezi alkaloidem narkotinem a obsahem kadmia v máku (Lachman et al. 2006).

3.9 Atomová absorpční spektrometrie

Atomová absorpční spektrometrie (AAS) patří mezi analytické instrumentální metody (Záruba et al. 2016). Využívala se již v devatenáctém století. Její zmodernění a celkové vylepšení nastalo v 50. letech 20. století díky Alanu Walshovi a jeho spolupracovníkům. Pomocí metody lze stanovit řadu prvků, především ze skupiny kovů (García & Báez 2012). Záruba et al. (2016) uvádí, že metoda je vhodná až pro 68 prvků s převahou kovů a menším zastoupením polokovů, jako je antimon, selen nebo arsen. García & Báez (2012) tvrdí, že metodou atomové absorpční spektrometrie je možné stanovit až 62 různých kovů. Atomová absorpční spektrometrie (AAS) se hojně využívá pro stanovování konkrétního prvku ve vzorku, tudíž se označuje za tzv. prvkovou analýzu. Vzhledem ke kvalitní instrumentaci této metody, lze stanovovat i stopová množství prvků, ať už pomocí plamene nebo elektrotermického ohřevu (Záruba et al. 2016). Metoda uplatňuje znění Lambert-Beerova zákona, který udává absorbanci, na jejímž základě je možné vypočítat koncentraci stanovovaného analytu ve vzorku a následně sestavit kalibrační křivku za použití standardů o známé koncentraci (García & Báez 2012).

3.9.1 Princip

Jednotlivé atomy prvku mají určitou elektronovou konfiguraci. V případě zvolení vhodné energie může dojít k absorpci záření, které zapříčiní přechod elektronů z nižších do vyšších energetických hladin nebo může dojít k uvolnění elektronu z atomu. V případě vzniku přebytečné energie při těchto procesech, může dojít k jejímu vyzařování v různých oblastech spektra. Pro znázornění přechodů elektronů slouží atomová absorpční spektra, jenž si lze představit jako úzké izolované čáry na tmavém pozadí. Smyslem metody je naměřit absorpci

přijatelného záření v uvolněných atomech, nacházejících se v plynném skupenství (Klouda 2003).

3.9.2 Instrumentace

Spektrometr pro analýzu vzorku obsahuje v základu: zdroj záření, atomizátor, monochromátor a detektor (Záruba et al. 2016).

Zdrojem záření je nejčastěji lampa s dutou katodou obsahující elektrody. Je tvořena skleněnou trubicí naplněnou inertním plynem, obvykle neonem nebo argonem, kde je umístěna anoda a katoda. V katodě se vyskytuje plyn, který bude analyzován samostatně nebo ve směsi (Filho et al. 2012). Po přiložení napětí k elektrodám dochází k elektrickému výboji mezi nimi a lze naměřit proud (Záruba et al. 2016). Atomy plnicího plynu jsou ionizované, a to urychlí jejich posun ke katodě, do níž narazí a způsobí svou silou vysunutí stanovovaného analytu (Filho et al. 2012). Atomy analytu přechází ze základního stavu do stavu excitovaného a následně emitují záření materiálu použité katody (Záruba et al. 2016). Lze využít i bezelektrodovou výbojku. Ta se využívá v menší míře vzhledem k vyšším pořizovacím nákladům (Filho et al. 2012).

Atomizátor se používá za účelem převedení vzorku do plynné fáze, obvykle z fáze kapalně, do které se vzorek převede před počátkem analýzy. Proces atomizace, který probíhá právě v atomizátoru, za vysokých teplot plamene nebo elektrotermického ohřevu, umožňuje měření atomových spekter specifických pro každý prvek, protože dojde k rozdělení sloučenin na jednotlivé atomy (Záruba et al. 2016).

Monochromátor je nedílnou součástí spektrometru. Jeho pomocí je přístroj schopen detekovat na základě vlnové délky absorbovaného záření ze vzorku konkrétní prvek zájmu při stanovení i z řady jiných prvků (García & Báez 2012).

Záření z monochromátoru je přeměrováno do detektoru, kterým je obvykle fotonásobič, jenž převádí světelný signál na elektrický, který je úměrný intenzitě světla (Filho et al. 2012).

3.9.3 Analýzy provedené u máku

Za účelem potravinové bezpečnosti v souvislosti s obsahem kadmia v máku byla provedena řada analýz. Knápek et al. (2011) provedli analýzy vzorků máku jednak z domácí české produkce, tak i máků dovážených na český trh. Zaměřili se nejen na samotná semena máku, ale i na makové výrobky. Po analýze makových semen i výrobků z nich, vzorky vykazovaly podobné hodnoty obsahů kadmia (bez ohledu na zemi původu) a všechny se pohybovaly v doporučeném rozmezí stanoveném legislativou (Knápek et al. 2011).

Větrovcová & Poslušná (2016) popsaly postup při stanovování přítomnosti kadmia ve směsném vzorku makových rostlin pěstovaných na území České republiky (viz. níže). Odebraný materiál se homogenizoval, rozemlel a následně byl vystaven mikrovlnnému záření v uzavřeném zařízení. Navážené množství vzorku bylo rozloženo po přidavku peroxidu vodíku a kyseliny dusičné v nádobě z teflonu. Následně se provedla samotná analýza na atomovém absorpčním spektrometru. Pro zajištění správnosti naměřených dat se provedla současně

analýza jetele lučního (*Trifolium pratense*) jako srovnávacího materiálu. Na základě provedených analýz bylo zjištěno určité množství kadmia v každém vzorku máku nehledě na oblast pěstování. Mezi jednotlivými lokalitami však byly značné rozdíly, tudíž se potvrdilo, že místo pěstování má jednoznačný vliv na obsah kadmia v rostlinách máku (Větrovcová & Poslušná 2016).

Tabulka 5 Obsah kadmia (mg/kg) v semeni máku ve vzorcích z provozních ploch, převzato z Větrovcová & Poslušná 2016

Lokalita	Cd (mg/kg)	Lokalita	Cd (mg/kg)
Komárov jih	0,61	Vršovice	0,818
Pusté Jakartice	0,347	Velké Heraldice	0,323
Vítkov	0,28	Chvalíkovice 2	0,623
Jelenice	1,15	Lukavice FOG 2	0,385
Komárov Černý mlýn	0,655	Paďour	0,592
Zlatníky	0,479	Mostek	0,219
Milostovice	0,272	Podlesí	0,197
Slavkov	0,23	Postřelmov	0,431
Komárov západ	0,294	Sudkov	0,203
Svatá Anna Opava	0,165	Šumperk - Opex	0,392
Otice	0,341	Němčičky	0,131
Lublice	0,718	Ořechov	0,478
Chvalíkovice	0,469	Troubsko - Opex	0,287
Krnov	0,667	Troubsko - Maratón	0,645
		Troubsko - Bergam	0,324

Tabulka 6 Obsah kadmia (mg/kg) v semeni máku ve vzorcích z pokusných parcel, převzato z Větrovcová & Poslušná 2016

Lokalita	Cd (mg/kg)
Troubsko	0,236
Lešany	0,232
Červený Újezd	0,348
Šumperk	0,434
Opava	0,522

4 Závěr

Mák setý (*Papaver somniferum* L.) patří mezi rostliny, které mají schopnost akumulovat vysoká množství kadmia především do svých semen. Vzhledem k jeho širokému využití v potravinářském průmyslu prochází rostlinný materiál přísnými kontrolami na obsah kadmia, které se řídí legislativními požadavky na maková semena. Kadmium nejenže působí negativně na růst a vývoj rostliny, ale může zároveň pronikat prostřednictvím stravy do lidského organismu. Jedná se o karcinogenní prvek, hromadící se především v játrech a ledvinách vyvolávající akutní i chronické otravy.

Rostlina máku přijímá největší množství kadmia kořeny z půdního roztoku a případně z atmosférických spadů na plochu listů. Klíčovým faktorem pro zajištění produkce kvalitních semen s minimálním nebo ideálně žádným obsahem kadmia je výběr vhodného pozemku k pěstování. Jako nejlepší se jeví pozemky, jejichž hodnota pH se pohybuje v rozmezí 6,2-6,8, které nejsou v oblastech zatížených vysokou koncentrací průmyslu a patří do středně těžkých půdních druhů, které jsou schopné vázat kovy do nerozpustných komplexů.

V případě potřeby částečného zlepšení půdních podmínek pro pěstování máku v oblastech s kyselejším půdním pH se doporučuje využít tzv. melioračního vápnění, díky kterému dojde k úpravě půdní reakce. Mák setý patří mezi rostliny s vysokými nároky na množství vápníku ve výživě, proto je nutné sledovat množství přístupného vápníku rostlině. Nebezpečí spočívá i v podobnosti chemických vlastností vápníku a kadmia, na základě níž, může dojít při nedostatku vápníku ke zvýšenému příjmu kadmia. Dále se doporučuje využívání kvalitních organických hnojiv, které podporují proces půdní sorpce.

Na základě dostupné literatury nebyla zaznamenána souvislost mezi odrůdou máku a množstvím kadmia, které je rostlina máku schopna akumulovat. Naproti tomu řada studií potvrzuje jasnou souvislost mezi množstvím kadmia v semenech máku s lokalitou, ve které je mák pěstován. Obsah kadmia také souvisí se zvýšenou produkcí alkaloidů v rostlině, což je v případě potravinářských odrůd nežádoucím jevem. Kadmium způsobuje rostlině abiotický stres, na který reaguje aktivací obranného systému, jímž je navýšená produkce alkaloidů.

Pro stanovení kadmia v rostlině máku se nejčastěji využívá prvkové analýzy metodou atomové absorpční spektrometrie, která je výhodná vzhledem k tomu, že je citlivá a dokáže detekovat i stopová množství prvku ve vzorku. Jedná se o instrumentální analytickou metodu založenou na principu absorpce záření volnými atomy v plynném stavu.

Problematikou kadmia v rostlině máku se zabírají především čeští autoři, neexistuje příliš mnoho zahraničních zdrojů. Většina literatury je staršího data, což se promítlo na větší náročnosti psaní této práce. Určitě by bylo vhodné se tématem dále zabírat i v budoucnu a důsledně monitorovat výskyt kadmia v životním prostředí. Zároveň je ale podstatné říci, že v rámci České republiky a celkově zemích patřících do Evropské unie, jsou obsahy kadmia v potravinách jak rostlinného i živočišného původu přísně kontrolovány a uváděny na trh jsou pouze produkty splňující legislativně stanovené podmínky.

5 Seznam použitých zdrojů

5.1 Tištěné monografie

Baranyk P. 2010. Olejniny. Profi Press, Praha.

Bechyně M. 1993. Základy pěstování máku. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství České republiky, Nové město nad Cidlinou.

Černý J. 2019. Jaký má vliv hnojení na produkci máku?. Pages 60-62. In 18. Makový občasník. ČZU, Praha.

Černý J, Kulhánek M, Sedlář M, Balík J. 2020. Faktory ovlivňující příjem kadmia mákem. Pages: 93-95. 19. Makový občasník. ČZU, Praha.

Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O. 2021. Půdní organická hmota v souvislostech s pěstováním máku. Pages: 55-60. 20. In Makový občasník. ČZU, Praha.

Fejér J, Šalamon I. 2010. Content of cadmium in oilseed poppy. Sborník ze “XVI. Semináře s mezinárodní účastí” 201-207.

Filho HJI, Salazar RFS, Capri MR, Neto AC, Alcântara MAK, Peixoto ALC. 2012. Atomic Absorption Spectrometry (AAS). Pages 13-36 in Farrukh MA, editor. Atomic Absorption Spectroskopy. InTech, Rijeka.

García R, Báez AP. 2012. Atomic Absorption Spectrometry (AAS). Pages 1-12 in Farrukh MA, editor. Atomic Absorption Spectroskopy. InTech, Rijeka.

Klouda P. 2003. Moderní analytické metody. Klouda, Ostrava.

Kratina T, Tošnarová H. 2022. Současná situace v oblasti produkce afghánského opia (máku) pro nelegální účely. Pages 19-25. In 21. Makový občasník. ČZU, Praha.

Linková B, Malý J. Výživa a hnojení máku z pohledu laboratoře v roce 2016. Pages 30-31. In 16. Makový občasník. ČZU, Praha.

Lohr. 2022. Změny v legislativě EU týkající se máku. Pages 11-14. In 21. Makový občasník. ČZU, Praha.

Malý J, Kapletová L. 2018. Výsledky listových a půdních analýz v roce 2017. Pages 40-43. In 17. Makový občasník. ČZU, Praha.

Mikšík V, Lohr V. 2020. The Czech Republic The Largest Producer Of Breadseed Poppy. Ministry of Agriculture.

Mikšík V. 2020. Budoucí rizika pěstování máku v ČR. Pages 10-15. In 19. Makový občasník. ČZU, Praha.

Musil D. 2017. Cílená výživa máku setého chytře. Pages: 59-61. In 16. Makový občasník. ČZU, Praha.

Novák J, Nováková H, 2018. Mák jako potravina a droga: Makový receptář. Aventium, Praha.

Novák J, Skalický M. 2017. Botanika: Cytologie, Histologie, Organologie a Systematika. Vyd. 4. Powerprint, Praha.

Trakal L, Tlustoš P, Száková J. 2009. Monitoring of Lead and Cadmium Movement in Soil, its Transport into the Willow Plants. Sborník Katedry rostlinné výroby ČZU, Praha.

Škarpa P, Richter R. 2017. Faktory ovlivňující obsah kadmia v semeni máku setého. Pages 32-35. In 16. Makový občasník. ČZU, Praha.

Vaculík A, Poslušná J. 2019. Vliv lokality a vybraných hnojiv na obsah kadmia v semeni máku setého. Pages 63-66. In 18. Makový občasník. ČZU, Praha.

Vašák J. 2010. Mák. Powerprint, Praha.

Velišek J. 1999. Chemie potravin 2. OSSIS, Tábor.

Větrovcová M, Poslušná J. 2016. Stanovení kadmia v semeni máku metodou atomové absorpční spektrometrie (AAS). Pages 68-69. 15. Makový občasník. ČZU, Praha.

Větrovcová M, Rychlá A, Havel J. 2016. Vliv genotypu na ukládání kadmia v semeni máku setého (*PAPAVER SOMNIFERUM* L.). Pages: 137-140 in Svachula V, Vach M, Honsova H, editors. Sborník z konference Prosperující olejniny. Katedra rostlinné výroby ČZU, Praha.

Vokřál. 2022. Marketing pomohl a pomáhá. Pages 4-6. In 21. Makový občasník. ČZU, Praha.

Záruba K, Mestek O, Řezanka P, Setnička V, Urban Š, Volka K. 2016. Analytická chemie (2. díl). VŠCHT, Praha.

5.2 Články v periodikách

Ackova DG. 2018. Heavy metals and their general toxicity on plants. *Plant Science Today* **5**: 14-18.

Amari T, Ghnaya T, Abdelly C. 2017. Nickel, cadmium and lead phytotoxicity and potential of halophytic plants in heavy metal extraction. *South African Journal of Botany* **111**: 99-110.

Demirkapu MJ, Yananli HR. 2020. Opium Alkaloids. *Bioactive Compounds in Nutraceutical and Functional Food for Good Human Health* DOI: 10.5772/intechopen.91326.

Ghori NH, Ghori T, Hayat MQ, Imadi SR, Gul A, Altay V, Ozturk M. 2019. Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology* **16**: 1807-1828.

Chizzola R. 2001. Micronutrient Composition of *Papaver somniferum* L. Grown under Low Cadmium Stress Condition. *Journal of Plant Nutrition* **24** (11): 1663-1677.

Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda K. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology* **7**: 60-72.

Kaboudin B, Sohrabi M. 2021. Chemistry and synthesis of major opium alkaloids: a comprehensive review. *Journal of the Iranian Chemical Society* **18**: 3177-3218.

Knápek J, Buchtová R, Vošmerová D. 2011. Content of Cadmium in Poppy Seeds and Poppy Seeds Containing Products Marketed in Czech Republic. *Journal of Environmental Science and Engineering* **5**:831-834.

Lachman J, Hejtmánková A, Miholová D, Koliňová D, Tluka P. 2006. Relations among alkaloids, cadmium and zinc contents in opium poppy (*Papaver somniferum* L.). *Plant, Soil and Environment* **52**: 282-288.

Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, Naidu R. 2012. Cadmium Sorption and Desorption in Soils: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **42**: 489-533.

Moghaddam M, Mehdizadeh L, Sharifi Z. 2020. Macro- and microelement content and health risk assessment of heavy metals in various herbs of Iran. *Environmental Science and Pollution Research* **27**: 12320-12331.

Mondal SC, Sarma B, Farooq M, Nath DJ, Gogoi N. 2019. Cadmium bioavailability in acidic soils under bean cultivation: role of soil additives. *International Journal of Environmental Science and Technology* **17**: 153-160.

Muhammad A, Akhtar A, Aslam S, Khan RS, Ahmed Z, Khalid N. 2021. Review on physicochemical, medicinal and nutraceutical properties of poppy seeds: a potential functional food ingredient. *Functional Foods in Health and Disease* **11**(10): 522-547.

Pan C, Chen J, Wu K, Zhou ZK, Cheng TT. 2018. Heavy Metal Contaminated Soil Imitation Biological Treatment Overview. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering* (e012113) DOI: 10.1088/1757-899X/301/1/012113.

Priya AK, Gnanasekaran L, Dutta K, Rajendran S, Balakrishnan D, Soto-Moscoco M. 2022. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere* (e135957) DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135957.

Sabolová M. 2020. Role máku ve výživě člověka. *Výživa a potraviny* **1**: 8-12.

Shaari NEM, Tajudin MTFM, Majrashi A, Alenazi MM, Abdullahi UA, Mohd KS. 2021. Cadmium toxicity symptoms and uptake mechanism in plants: a review. *Brazilian Journal of Biology* **84**: 1-17.

Wang R, Sang P, Guo Y, Jin P, Cheng Y, Yu H, Xie Y Yao W, Qian H. 2023. Cadmium in food: Source, distribution and removal. *Food Chemistry* (e134666) DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134666.

Zulfigar U, Jiang W, Xiukang W, Hussain S, Ahmad M, Maqsood MF, Ali N, Ishfaq M, Kaleem M, Haider FU, Farooq N, Naveed M, Kucerik J, Brtnicky M, Mustafa A. 2022. Cadmium Phytotoxicity, Tolerance, and Advanced Remediation Approaches in Agricultural Soils; A Comprehensive Review. *Frontiers in Plant Science* (e77381) DOI: 10.3389/fpls.2022.773815.

5.3 Webové stránky

Český modrý mák z.s. 2022. Cíle spolku. Available from

a) <https://ceskymodrymak.cz/cs/spolek/cile-spolku> (accessed February 2023)

Český modrý mák z.s. 2022. Česká cechovní norma. Available from

b) <https://ceskymodrymak.cz/cs/mak/guild> (accessed March 2023)

Český modrý mák z.s. 2022. Historie spolku. Available from

c) <https://ceskymodrymak.cz/cs/spolek/historie-spolku> (accessed March 2023)

Český modrý mák z.s. 2022. Legislativa. Available from

d) <https://ceskymodrymak.cz/cs/mak-jako-komodita/legislativa-mak> (accessed February 2023)

EUR-Lex. 2021. Commission Regulation 2021/2142. Available from

a) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R2142&qid=1679486592174> (accessed February 2023)

EUR-Lex. 2021. Commission Regulation 2021/1323. Available from

- b) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1323&qid=1679486662425> (accessed February 2023)

Lošák T, Varga L. 2022. Rizikové látky v půdě a rostlinách na příkladu kadmia při pěstování máku setého. Agromanuál, České Budějovice. Available from

<https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/rizikove-latky-v-pude-a-rostlinach-na-prikladu-kadmia-pri-pestovani-maku-seteho> (accessed March 2023)

Zákony pro lidi. 2013. Vyhláška č. 399/2013 Sb. Available from

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2013-399> (accessed March 2023)

6 Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 Rozdělení půdních druhů podle podílu zrnitosti frakce, převzato z Černý et al. 2021	26
Tabulka 2 Obsah kadmia ve vzorcích máku z půdních pokusů s fungicidy, 2016 - 2017, převzato z Vaculík & Poslušná 2019.....	28
Tabulka 3 Obsah kadmia ve vzorcích z provozních polí s mákem (mg/kg), 2016-2017, převzato z Vaculík & Poslušná 2019.....	29
Tabulka 4 Analýza rostlin na obsah kadmia (Cd) v semeni, makovicích, stonku, kořenu (mg/kg), převzato z Lošák & Varga 2022	30
Tabulka 5 Obsah kadmia (mg/kg) v semeni máku ve vzorcích z provozních ploch, převzato z Větrovcová & Poslušná 2016	32
Tabulka 6 Obsah kadmia (mg/kg) v semeni máku ve vzorcích z pokusných parcel, převzato z Větrovcová & Poslušná 2016	32